

KAMPŲ MATAVIMO ĮRANGOS APŽVALGA IR PLĖTROS PERSPEKTYVOS

Giedrius Augustinavičius¹, Audrius Čereška²

Vilniaus Gedimino technikos universitetas

El. paštas: ¹mgkat@vgtu.lt; ²audrius.cereska@vgtu.lt

Santrauka. Straipsnyje aprašyta kampų matavimo įranga ir kamparavimo būdai. Atlikta kampų matavimo įrangos tikslumo analizė. Įvertintas kampinių matavimų stendo kampinio pozicionavimo tikslumas. Numatytos kampų matavimo įrangos plėtros perspektyvos.

Reikšminiai žodžiai: kampų komparatorius, kampo keitikliai, kampo matavimai.

Įvadas

Informacinės kampų matavimo sistemos ir jų elementai – rastrinės ir kodinės skalės, kampo keitikliai, žiediniai lazeriai (lazeriniai girometrai) – plačiai naudojami automatizuotose metalo pjovimo staklėse ir mašinose, robotų valdymo sistemose, matavimo prietaisuose ir navigacijos įrenginiuose. Linijinių poslinkių mechanizmai ir mašinos ir matavimo technika yra labai gerai išnagrinėti ir aprūpinti matavimo technika ir etalonais. To negalima pasakyti apie kampų matavimų prietaisus ir sistemas. Kampų matavimo sistemų tikslumo parametrų tikrinimas reikalauja specialios įrangos ir kampo etalonų naudojimo, o šiuolaikiniuose įrenginiuose ir prietaisuose naudojamų kampų matavimo sistemų įvairovė dar labiau apsunkina šį uždavinį (Giniotis 2005).

Tik žinant kampų matavimo įrangos raidą galima tobulinti esamus ir kurti naujus matavimo būdus bei įrangą.

Kampų matavimo įranga ir kamparavimo būdai

Toliau apžvelgiamos kampų matavimo priemonės.

Poligonas / autokolimatorius. Stendo centre yra precizinio tikslumo daugiakampė prizmė – poligonas. Precizinio tikslumo daugiakampė prizmė turi veidrodinius paviršius, tarp kurių yra labai tikslūs kampai. Paprastai daugiakampę prizmę sudaro 12–20 arba 24, 36, o kartais net 72 paviršiai (1 pav.). Daugiakampės prizmės dažniausiai gaminamos iš plieno arba kvarcinio stiklo (Giniotis 2005).

Autokolimatorius – tai prietaisas, naudojamas tiksliai kampams palyginti, pasitelkiant veidrodžio atspindį.

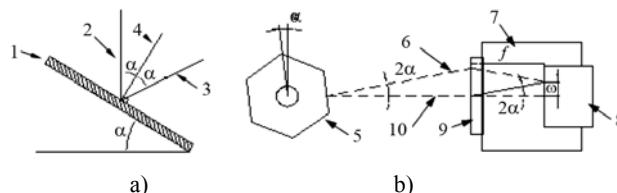
Autokolimatoriaus veikimo principas pagrįstas šviesos šaltinio atspindžiu nuo veidrodinio paviršiaus (2 pav.).

Kampas tarp siunčiamo ir atspindėjusio šviesos srauto yra 2α . Matuojant kampą tarp siunčiamo ir atspindėjusio šviesos srauto galima nustatyti veidrodinio paviršiaus padėtį. Autokolimatoriaus šviesos srautas (taškas, linija ar kita forma) siunčiamas į daugiakampės prizmės paviršiaus plokštumą 5 ir tuo pat metu grąžinamas į autokolimatoriaus okuliarą. Jei daugiakampės prizmės veidrodinio paviršiaus statmuo 4 nėra vienoje linijoje su autokolimatoriaus ašimi, t. y. su iš autokolimatoriaus siunčiamu šviesos srautu 10, tada prizmės statmuo su autokolimatoriaus ašimi sudaro kampą α . Atspindėjęs šviesos srautas 6



1 pav. Poligonas su aštuoniais veidrodiniais paviršiais

Fig. 1. Example of polygon (pictures taken at PTB) with 8 mirror faces



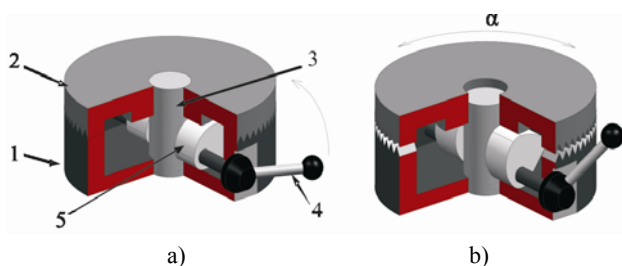
2 pav. Poligono / autokolimatoriaus veikimo principas: veidrodžio šviesos atspindys (a); autokolimatoriaus veikimo principas (b)

Fig. 2. Polygon/autocollimator work principles: mirror light reflection (a); b) autocollimator operation principle (b)

su autokolimatoriaus ašimi 10 sudaro kampą 2α . Atsi-
spindėjęs šviesos srautas per objektyvą 9 patenka į oku-
liarą 8. Apskaičiavus atstumą ε tarp siunčiamo ir sugrą-
žinto į okuliarą šviesos srauto galima nustatyti
daugiakampės prizmės kampinę padėtį.

„Moore’s Precision Index“ *įrenginys*. Šiuo įrenginiu
pasiekiamas labai didelis kampo pozicionavimo tikslu-
mas, kurio paklaida neviršija 0,1". Jo pagrindinę dalį su-
daro dviejų disko pavidalo detalių sukabinimas dantukais,
esančiais galiniuose šių diskų paviršiuose (3 pav.). Prie-
taiso išradimas patentuotas firmoje „Moore“ (JAV), o jo
pagrindu buvo sukurti kampų matavimo prietaisai ir Lie-
tuvoje (ISO 5725-4).

Prietaiso pagrindo 1 viršutinėje žiedinėje dalyje yra
įpjauti maži dantukai turintys trikampį, plokščią arba ru-
tulio dalies profilį, o dantukų pašaknyse – griovelius, kad
dantukų sukabinimas būtų laisvas ir garantuotas, nebūtų
ribojamas dantukų viršūnių netikslumų. Toks pat skaičius
dantukų įpjautas viršutinio disko 5 žiediniame galiniame
paviršiuje. Pasukus rankenėlę 7, kumštelis 6 per įvorę 4
pakelia viršutinį diską 5, dantukai atsiskiria, ir diską ga-
lima pasukti norimu kampu. Paskui jis vėl nuleidžiamas,
dantukai susikabina, fiksuodami tikslią kampo padėtį
(Total Stations Specifications 2009).



3 pav. Supaprastinta „Moore’s Precision Index“ įrenginio
schema: matavimo padėtis (a); kampo keitimo padėtis (b)

Fig. 3. The cut-out section of simplified “Moore’s Precision
Index” table: measuring position (a); angle changing position (b)

Optinė skalė/mikroskopas. Skalei nuskaityti reikia
labai tikslios apskritiminės skalės ir vieno arba kelių mik-
roskopų (priklausomai nuo matavimo metodų).

Taikant šį matavimo būdą reikia apskritiminio disko
su ant jo įpresuota apskritimine skale. Daugelyje labai
tikslų matavimo prietaisų pamatinio mato skalės daž-
niausiai gaminamos iš specialios medžiagos, vadinamos
niuzilberiu (vok. *neusilber*, pažodžiui – naujasis sidab-
ras – tai vario lydinys, turintis 20 % cinko ir 15 % nike-
lio), arba sidabro juostelių, įpresuotų į griovelį, esantį
kito metalo (dažniausiai bronzos) disko paviršiuje (Ginio-
tis 2005).

Matavimo tikslumas matuojant optine skale / mikro-
skopu priklauso nuo šių veiksnių:

- skalės padalų kokybės;
- matavimo proceso kokybės;
- mikroskopų kokybės;
- guolių ekscentriciteto;
- guolių susidėvėjimo.

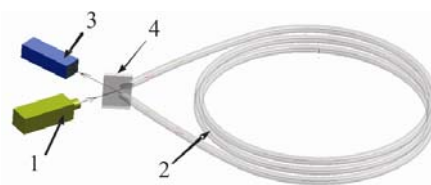
Apskritiminio disko kampinei padėčiai nustatyti
naudojami mikroskopai. Limbo padėtis nustatoma naudo-
jant linijines vertes. Žinant skalės skersmenį galima ap-
skaičiuoti apskritiminio disko kampinę vertę.

Kampiniai keitikliai. Ši kampų matavimo priemonė
labai plačiai taikoma mūsų dienomis. Kampiniai keitikliai
naudojami metalo pjovimo staklių sukamųjų stalų pasu-
kimo kampams matuoti ir valdyti, matavimo prietaisų
kampų atskaitymo ir matavimo sistemose, pramoninių
robotų kampinių dydžių matavimo ir valdymo sistemose.
Kampinių keitiklių veikimas pagrįstas fotoelektriniu
principu (Probst 1998).

Didesnio tikslumo kampiniai keitikliai veikia fotoe-
lektrinio nuskaitymo principu (Principles of Action of the
Angular Encoders 2009). Fotoelektrinio principo veiki-
mas yra nekontaktinis. Šiuo metodu nuskaitytos keletos
mikronų pločio linijos ir mažais periodais generuojami
išėjimo signalai. Pagal nuskaitymo veikimo principus
fotoelektriniai kampo keitikliai skirstomi į:

- optinio nuskaitymo;
- interferencinio nuskaitymo.

Lazerinis girometras. Šis prietaisas (4 pav.) dėl op-
tinių šviesolaidžių (du šviesos spinduliai juda priešingo-
mis kryptimis susuktame šviesolaidyje) naudojimo tapo
itin kompaktiškas, teikiantis labai diskrečią informaciją.
Tai labai plačiai techniniams matavimams naudojamas
prietaisas (Kahmen 1998). Jo principinę schemą sudaro
klasikinio girometro konstrukcija. Kvarcinio stiklo priz-
mės vidiniame paviršiuje du priešingomis kryptimis ei-
nantys lazerio spinduliai interferuoja, fotoelementas re-
gistruoja interferencinių juostų kitimą, o interferencijos



4 pav. Lazerinis girometras: 1 – šviesos šaltinis (lazeris);
2 – optinis šviesos kreiptuvas; 3 – šviesos priėmiklis (foto-
diodas); 4 – optinė prizmė

Fig. 4. Ring laser: 1 – light source (laser); 2 – optic light guide;
3 – light receiver (photodiode); 4 – optic prism

periodas dar gali būti interpoliuojamas. Kampo vertę ir jos pokytį galima išmatuoti 0,1" arba net 0,01". Matavimo tikslumas taip pat yra labai didelis, sistemingoji matavimo paklaida neviršija kelių dešimtųjų kampo sekundės. Prietaisas tinka naudoti navigacijos tikslams, juo galima matuoti sukimosi kampą, kampinius greičius ir pagreičius.

Kampų matavimo įrangos tikslumo analizė

Atliekant matavimus poligonu / autokolimatoriumi pasiekiamas gana aukštas matavimų tikslumas, ekscentriciteto įtaka nedidelė, matavimo procesas gana paprastas (reikia autokolimatoriaus ir daugiakampės prizmės), nesudėtingas montavimas, tačiau matavimų intervalas yra mažas (apie 10"); matavimų diskretiškumas priklauso nuo daugiakampės prizmės paviršių skaičiaus ir jos tikslumo; gaunami nuokrypiai, kai matuojama ne prizmės paviršiaus centre.

Matuojant „Moore's 1440 Precision Index“ įrenginiu pasiekiamas matavimų tikslumas (mažiau nei 0,1"), matavimų diskretiškumas (mažiau nei 5"), paprastas įrenginio veikimo principas ir stabili konstrukcija, bet įrenginys brangus, matavimo procesą labai sudėtinga automatizuoti, įrenginio viršutinės plokštės pakėlimas sukelia papildomas matavimų paklaidas.

Labai tikslūs matavimai (priklausomai nuo mikroskopo tikslumo, mažiau nei 0,2") pasiekiami matuojant optine skale / mikroskopu; matavimų diskretiškumas, priklausomai nuo skalės, būna 1–5°, tačiau apskritiminė skalė yra didelio skersmens ir reikia, kad ji būtų preciziškai tiksli; būdingas labai ilgas proceso kalibravimo laikas.

Matuojant kampo keitikliais pasiekiamas mažiau nei 0,4" matavimų tikslumas, matavimų diskretiškumas – mažiau nei 0,01", nedideli įrenginio gabaritai, įrenginys patikimas ir jį lengva automatizuoti, tačiau reikia preciziškai tikslios mechaninės instaliacijos, be to, įrenginys gana brangus.

Lazerinio girometro tikslumas siekia apie 0,5", matavimo diskretiškumas mažas, tačiau neigiamas bruožas – naudoti šį įrenginį kampams komparuoti trukdo jo dinaminis veikimo principas.

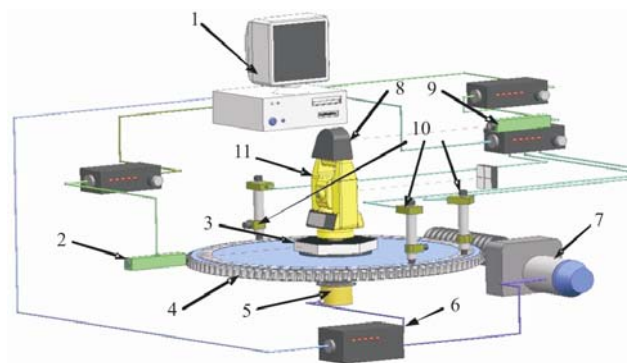
Vilniaus Gedimino technikos universiteto Geodezijos institute sukurtas specializuotas stendas kampų matavimo geodeziniais prietaisais kalibruoti. Stendui kurti panaudota tiksli (~3") ir standi apskrito dalinimo mašina, joje įdiegtas automatinis kompiuterinis valdymas.

Apskrito dalinimo mašina (5 pav.) buvo modernizuota – įmontuotas precizinis kampo keitiklis 5, žingsninis variklis su nuolatinio įvėržio sliekine pavara 7 bei viso stendo veikimą valdantis elektroninis blokas 6 ir kompiuteris 1 (Giniotis *et al.* 2008).

Kompiuteryje nurodoma stendo stalo pasukimo kampinė padėtis. Duomenys perduodami į valdymo bloką, iš kurio impulsai žingsniniam varikliui siunčiami tol, kol kampo keitiklio rodmuo pasiekia kompiuteryje nustatytą rodmenį (t. y. stalas pasukamas į reikiamą padėtį).

Kampo keitiklio rodmenys (stalo kampinė padėtis) lyginami su tikrinamojo prietaiso rodmenimis ir įvertinus prietaiso sukamosios dalies kampinę padėtį nustatomos prietaiso rodmenų paklaidos.

Siekiant tikrinti ir palyginti matavimus, prie stendo sumontuoti papildomi prietaisai – poligonas 3 su autokolimatoriumi 2 ir mikroskopai 10, naudojantys į sukamą stalą įmontuotą skalę kaip kampo etaloną. Ir autokolimatoriai (disko kampinės ir geodezinio prietaiso padėties nustatymo), ir mikroskopai modernizuoti naudojant CCD elementus, leidžiančius nuskaityti skalės brūkšnio padėtį ir perduoti rodmenis į kompiuterį.



5 pav. Bendra kalibravimo stendo schema: 1 – kompiuteris; 2 – autokolimatorius; 3 – daugiakampė prizmė; 4 – sukamasis stalas (sliekratis); 5 – fotoelektrinis kampo keitiklis; 6 – stalo pavaros valdymo blokas; 7 – žingsninis variklis su sliekine pavara; 8 – tikrinamojo prietaiso pozicionavimo veidrodis; 9 – tikrinamojo prietaiso padėties nustatymo autokolimatorius; 10 – mikroskopai; 11 – tikrinamasis geodezinis prietaisas

Fig. 5. Basic mode of test rig operation: 1 – PC; 2 – auto-collimator; 3 – polygon; 4 – rotary table of the rig; 5 – angle encoder; 6 – encoder/motor electronic control device; 7 – step motor/worm gear; 8 – mirror of the tested instrument; 9 – auto-collimator of position of the tested instrument; 10 – microscopes; 11 – tested instrument

Kampų kalibravimo stendas pavaizduotas 6 pav.

Išanalizavus keitiklių charakteristikas, nustatyta, kad tiksliausio šiuo metu gaminamo *Heidenhain* firmos (Vokietija) keitiklio paklaida siekia $\pm 0,4$, kai signalai formuoti, ir $\pm 0,2$, kai signalai specialiai derinti, neformuojant.

Kaip matyti iš lentelės, sukamojo disko pozicionavimo, atlikto fotoelektriniu kampo keitikliu, tikslumas yra nepakankamas, o nustatant kampinę padėtį skale / mikroskopu (tikrinant poligonu / autokolimatoriumi) buvo gana didelis tikslumas.

Lentelė. Kampo matavimo priemonių tikslumo reikšmės

Table. Mechanical errors of angle measurement devices

		Pozicionavimas fotoelektriniu keitikliu, tikrinant poligonu / autokolimatoriumi	Pozicionavimas fotoelektriniu keitikliu, tikrinant skale / mikroskopu	Pozicionavimas skale/mikroskopu, tikrinant poligonu / autokolimatoriumi
Pakartojamumas	Stand. nuokrypis	2,23"	2,34"	0,382"
	Neapibrėžtis	0,273"	0,287"	0,0468"
Atkuriamumas	Stand. nuokrypis	4,81"	5,20"	0,663"
	Neapibrėžtis	0,590"	0,638"	0,0813"



6 pav. Bendras kampų kalibravimo įrenginio vaizdas

Fig. 6. Base view of test rig

Kampų matavimo įrangos plėtros perspektyvos

Kampo vieneto sistis realizuojama per daugiabriaunę prizmę – poligoną, tačiau, prireikus operatyviai kalibruoti limbus arba kampinių poslinkių keitiklius, šis metodas neužtikrina reikiamo kampo reikšmių skaičiaus, yra nenašus, juo negalima kalibruoti keitiklių elektrinių signalų lygiu. Todėl norint operatyviai kalibruoti turi būti papildomai numatomas arba precizinis kampinių poslinkių keitiklis, arba precizinis didelio skersmens limbas įvertinant kampą mikroskopais arba optoelektronine galvute.

Naujos kartos kampų matavimo įrenginių pavaros gali būti pjzoelektrinės. Šios pavaros yra paprastos konstrukcijos, mažų matmenų ir svorio, naudoja nedaug energijos, kai kurios jos charakteristikos – didelė skyra, greಿತaveika, paprastas valdymo algoritmas – labai svarbios mechatroninėms sistemoms kurti.

Išvados

1. Automatizavus kampų komparatoriaus valdymo bloką patikros ir kalibravimo laikas labai sutrumpėja (ypač elektroninių prietaisų atveju) lyginant su įprastiniais patikros ir kalibravimo būdais.
2. Labai sutrumpėja duomenų įvedimo ir statistinio apdorojimo laikas, kadangi visi duomenys iš karto gaunami elektroniniu būdu ir tuojau pat gali būti atliekami statistiniai skaičiavimai.

3. Disko pozicionavimo, atlikto turimu fotoelektriniu kampo keitikliu, tikslumas yra nepakankamas, o kampinės padėties nustatymo skale / mikroskopu (tikrinant padėtį poligonu / autokolimatoriumi) duomenys buvo gana didelio tikslumo.
4. Automatizuoto kampų komparatoriaus valdymo bloko pozicionavimas vis tiek nėra patogus, trukdo ir labai dideli įrenginio gabaritai, todėl tikslinga kurti tobulesnį kampų komparavimo įrenginį.

Literatūra

- Giniotis, V. 2005. *Padėties ir poslinkių matavimas*. Monografija. Vilnius: Technika.
- Giniotis, V., et al. 2008. *Kampų matavimo sistemų tikslumo bandymo nanometrinės skyros mechatroninių įrenginių kūrimas ir tyrimas (Gono test)*. Tarpinė ataskaita. Vilnius.
- ISO 5725-4:1994 *Accuracy (Trueness and Precision) of Measurement Methods and Results – Part 4: Basic Methods for the Determination of the Trueness of a Standard Measurement Method*. Geneva, 1994. 23 p.
- Kahmen, K.; Faig, W. 1988. *Surveying*. Berlin: Walter de Gruyter. 578 p.
- Principles of Action of the Angular Encoders* [interaktyvus]. 2009. Heidenhain [žiūrėta 2009 m. balandžio 10 d.]. Prieiga per internetą: <http://www.heidenhain.de/index.php?WCMSGroup_489_42=778>.
- Probst, R.; Witterkopf, R.; Krause, M.; Dangschat, H.; Ernst, A. 1998. The New PTB Angle Comparator, *Measurement Science Technology*, IOP Publishing 9: 1059–1066.
- Total Stations Specifications* [interaktyvus]. 2009. Trimble [žiūrėta 2009 m. vasario 4 d.]. Prieiga per internetą: <<http://www.trimble.com/totalstations.shtml?WT.svl=img3>>.

REVIEW OF DEVICES FOR MEASURING ANGLES AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT

G. Augustinavičius, A. Čereška

Abstract

The article analyzes the methods and devices for angle measurement. An accurate analysis of devices for angle measurement was performed. The accuracy of the angle position of the tested device was evaluated. The future perspectives of devices for angle measurement were explored.

Keywords: angle measurement, calibration of angle devices, angle comparator.